بررسی اثر متغیرهای جوشکاری بر اتصال غیر همجنس اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای ورق‌های Al-۵۰۸۳ و St-۱۲*

اسکندر فریدونی[۱]   مجتبی موحدی[۲]   امیرحسین کوکبی[۳]

چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر متغیرهای سرعت چرخشی و زمان ماند بر استحکام اتصالات غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم Al-۵۰۸۳ و فولاد St-۱۲ می‌باشد که با فرآیند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای و بدون ورود پین به ورق فولادی (ورق پایینی) به یکدیگر متصل شده‌اند. سرعت‌های چرخشی، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان‌های ماند، ۵ الی ۱۵ ثانیه بودند. نتایج نشان داد که استحکام اتصالات با افزایش زمان ماند ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. علاوه بر این، استفاده از سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه اتصالات مستحکم‌تری را نسبت به سرعت ۱۱۰۰ دور بر دقیقه به همراه داشت.

واژه‌های کلیدی جوش اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای، سرعت چرخشی، زمان ماند، نیروی شکست.

Effect of Welding Parameters on Dissimilar Friction Stir Spot Welded Al-5083/St-12 Alloy Sheets

E. Fereiduni   M. Movahedi   A.H. Kokabi

Abstract

The present study investigates the effect of rotational speed and dwell time on the strength of Al-5083/St-12 friction stir spot joints. The welds were made using a newly developed FSSW process in which the tool pin did not penetrate into the lower steel sheet. Rotational speeds of 900 and 1100 rpm were applied in association with the dwell times in the range of 5-15 s. Results showed that the strength was first improved and then declined with increasing the dwell time. Furthermore, stronger joints were achieved at 900 rpm compared to the rotational speed of 1100 rpm.

Key words Friction stir spot welding, Rotational speed, Dwell time, Fracture load.

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ۹۳/۹/۶ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ۹٤/۲/۲۲ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، گرایش جوشکاری، دانشگاه صنعتی شریف.

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی شریف.   Email: m_movahedi@sharif.edu

(۳) استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی شریف.

DOI: 10.22067/ma.v0i29.41755

مقدمه

ایجاد اتصال بین قطعاتی از جنس آلیاژهای آلومینیم و فولاد در سازه‌های مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است. در حالی که آلیاژهای فولادی، استحکام لازم برای سازه‌های یاد شده را تضمین می‌کنند، کاهش وزن و افزایش مقاومت به خوردگی آن‌ها به واسطه آلیاژهای آلومینیمی تضمین می‌شود [1].

به عنوان نوعی از فرآیندهای جوشکاری ذوبی، فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به صورت گسترده‌ای به منظور اتصال ورق‌های آلومینیم به فولاد در صنایع مختلف استفاده می‌شود. اگرچه، این فرآیند برای اتصال‌دهی فلزات و آلیاژهای سبک دارای محدودیت‌هایی همچون هدایت حرارتی و الکتریکی بالای فلزات سبک، مستهلک و فرسوده شدن الکترودها حین ایجاد اتصال، اعوجاج حرارتی زیاد و استحکام پایین اتصال می‌باشد [2، 3 و 4]. از سوی دیگر، به عنوان نوعی از فرآیندهای جوشکاری ذوبی، استفاده از فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به منظور ایجاد اتصال بین آلومینیم و فولاد منجر به تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد و ضخیم شده که می‌تواند کارآیی اتصال را به شدت تحت تاثیر قرار دهد [2 و 3].

فرآیند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای به عنوان یک فرآیند جوشکاری حالت جامد در چند سال اخیر به منظور اتصال ورق‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در حقیقت، فرآیند یاد شده را می‌توان به عنوان شاخه‌ای از فرآیند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی محسوب کرد. نحوه انجام این فرآیند به نحوی است که ابتدا ابزار در حال چرخش تا عمق مشخصی (عمق نفوذ) به درون ورق‌هایی که بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند وارد می‌شود. پس از گذشت زمان مشخص (زمان ماند)، ابزار از درون قطعه کار خارج شده و حفره‌ای را در محل خروج خود بر جای می‌گذارد. حرارت ایجاد شده در اثر اصطکاک بین پین و قطعه کار منجر به نرم شدن مواد اطراف پین می‌شود. در نتیجه مواد حرارت دیده و نرم شده، تغییر شکل پلاستیک داده و در نهایت اتصال حالت جامد در فصل مشترک ورق‌های بالایی و پایینی برقرار می‌شود [5].

به دلیل جدید بودن فرآیند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای در اتصال آلیاژهای آلومینیم به فولاد، تاکنون مطالعات چندانی در این زمینه انجام نپذیرفته است. سان و همکارانش [6] به صورت موفقیت آمیزی ورق‌های آلومینیم آلیاژ Al-۶۰۶۱ و فولاد ساده کربنی با ضخامت‌های ۱ میلی‌متر را با استفاده از این فرآیند به یکدیگر متصل نمودند. مشاهدات آن‌ها حاکی از آن است که سرعت چرخشی ۷۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۲ ثانیه حالت بهینه متغیرهای یاد شده برای دست‌یابی به حداکثر استحکام می‌باشد. بنابراین، آن‌ها سه ابزار با ارتفاع پین‌های متفاوت ۱، ۱/۳ و ۱/۵ میلی‌متر را به منظور جوشکاری ورق‌ها مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که حداکثر نیروی شکست حاصل شده برابر با ۳۲۰۰ نیوتون بوده و با استفاده از ابزار با ارتفاع پین ۱ میلی‌متر بدست آمده است. علاوه بر این، مشاهدات حاکی از آن بود که هیچ‌گونه ترکیب بین فلزی آلومینیوم-آهن در فصل مشترک اتصال تشکیل نشده اگر چه ساختاری آمورف درون آلومینیم در نزدیکی فصل مشترک دیده شده است. محققین یاد شده معتقدند که برقراری یک اتصال اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای مستحکم در صورتی امکان پذیر خواهد بود که ترکیبات بین فلزی در امتداد فصل مشترک تشکیل نشده باشند. بوزی و همکارانش [7] به اتصال اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای آلیاژ آلومینیم Al-۶۰۶۱ و فولاد عاری از عناصر بین‌نشین به ترتیب با ضخامت‌های ۱/۲ و ۲ میلی‌متر پرداخته‌اند. متغیرهای به کار گرفته شده در این تحقیق، سرعت چرخشی و عمق نفوذ ابزار بوده‌اند. بر

این اساس، سرعت‌های چرخشی ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۳۵۰۰ دور بر دقیقه به ترتیب با عمق نفوذ ۲/۵، ۲/۹ و ۲/۹ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن بود که در شرایط یاد شده ترکیبات بین فلزی به ترتیب با ضخامت‌های ۵، ۸ و ٤۲ میکرومتر در فصل مشترک اتصال شکل گرفته است. نیروی شکست نیز برابر با ٤۲۰۰ نیوتون و مربوط به نمونه جوشکاری شده با شرایط سرعت چرخشی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و عمق نفوذ ۲/۹ میلی‌متر بوده است. محققین یاد شده معتقدند که حضور بین فلزی‌ها در فصل مشترک به منظور دست‌یابی به استحکام مطلوب ضروری می‌نماید. مطابق اطلاع نگارنده، تاکنون پژوهشی در زمینه بررسی تاثیر همزمان متغیرهای سرعت چرخشی و زمان ماند بر روی استحکام جوش‌های اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای غیرهمجنس آلومینیم به فولاد صورت نپذیرفته است. علاوه بر این، همان‌گونه که ذکر شد، توافقی نیز در مورد تاثیر بین فلزی‌ها بر استحکام اتصالات اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای حاصل نشده است. در پژوهش حاضر، روشی جدید به منظور جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای ورق‌های غیر همجنس آلومینیمی به فولادی ارائه گردیده است که در آن، از ورود پین به درون ورق فولادی جلوگیری به عمل آمده است. علاوه بر این، سعی بر آن است تا تاثیر دو متغیر سرعت چرخشی و زمان ماند بر روی تشکیل بین فلزی‌ها و در نتیجه استحکام اتصالات مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از ورق‌های آلومینیم آلیاژ Al-۵۰۸۳-H۳۲۱ و فولاد St-۱۲ آنیل شده به ترتیب با ضخامت‌های ۳ و ۱ میلی‌متر استفاده شد. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی ورق‌ها به ترتیب در جدول (۱) و جدول (۲) ارائه شده است. ابعاد هر کدام از ورق‌ها ۱۰۰×۳۵ میلی‌متر بود و سطوحی از آن‌ها که قرار بود به یکدیگر متصل گردند، توسط برس آماده‌سازی مکانیکی شدند و با میزان همپوشانی ۳۵ میلی‌متر بر روی یکدیگر گذاشته شدند به نحوی که ورق آلومینیمی در بالا و ورق فولادی در پایین قرار داشت. جوش‌ها در مرکز ناحیه همپوشانی یاد شده با ابعاد ۳۵×۳۵ میلی‌متر و با استفاده از دستگاه جوشکاری اصطکاکی تلاطمی به صورت نقطه‌ای انجام پذیرفت. حفره‌ای به قطر ۱/۵ میلی‌متر درون ورق فولادی ایجاد شد. فاصله مرکز حفره یاد شده تا مرکز جوش برابر با ۵ میلی‌متر بود و هدف از ایجاد آن، اندازه‌گیری تغییرات دمایی در فصل مشترک اتصال و در نزدیکی موضع جوشکاری بود. دمای فصل مشترک با استفاده از ترموکوپل نوع K اندازه‌گیری شد. ابزار مورد استفاده دارای قطر شانه، قطر پین و ارتفاع پینی به ترتیب برابر با ۲۰، ۵ و ۲/۸ میلی‌متر بود. جنس ابزار یاد شده نیز از فولاد ابزارH-۱۳ عملیات حرارتی شده با سختی ۵۳ راکول C انتخاب گردید. سرعت‌های چرخشی ۹۰۰ و ۱۱۰۰ دور بر دقیقه هر کدام برای زمان‌های مانند ۵، ۷، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ ثانیه به منظور جوشکاری نمونه‌ها به کار گرفته شدند. نرخ فروروی ابزار درون ورق‌ها برابر با ۰/۱۱ میلی‌متر بر ثانیه بود. آزمون کشش نمونه‌ها توسط دستگاه کشش Instron و با نرخ کششی برابر با ۵ میلی متر بر دقیقه تعیین شد و نتایج به صورت حداکثر نیروی قابل تحمل جوش‌ها ارائه گردید. مقادیر نیروی گزارش شده برای هر کدام از حالت‌های جوشکاری مربوط به میانگین ۳ آزمون می‌باشد. به منظور جلوگیری از پیچش و عدم همراستایی ورق‌ها حین انجام آزمون کشش از قید و بند استفاده شد. پیش و پس از آزمون کشش، از مواضع شکست نمونه‌ها مقاطع عرضی تهیه شد. ورق‌های فولادی توسط محلول نایتال ۲ درصد حکاکی شدند در حالی که ورق‌های آلومینیمی با استفاده از محلول

بارکر (۵ میلی‌لیتر HBF۴ در ۲۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر) در ولتاژ ۲۰ ولت و به مدت زمان ۳ دقیقه حکاکی الکتروشیمیایی گردیدند. مقاطع عرضی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی مشاهده گردید و ارتباط بین ریزساختار فصل مشترک اتصال و استحکام نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی ورق‌های آلومینیم ۵۰۸۳-H۳۲۱ و فولاد St-۱۲ مورد استفاده در این تحقیق (درصد وزنی)

	منیزیم	منگنز	سیلیسیم	آهن
۵۰۸۳-H۳۲۱	۴/۴۵	۰/۴۷	۰/۴۹	۰/۲
St-۱۲ آنیل شده	فسفر و گوگرد	سیلیسیم	منگنز	کربن
	کمتر از ۰/۵	۰/۰۴	۰/۵	کمتر از ۰/۱

جدول ۲ خواص مکانیکی ورق‌های آلومینیم ۵۰۸۳-H۳۲۱ و فولاد St-۱۲

	درصد ازدیاد طول	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	سختی ویکرز (HV20Kg)
۵۰۸۳-H۳۲۱	۷	۳۲۲	۲۶۴	۷۵
St -۱۲ آنیل شده	۴۸	۲۸۴	۱۹۳	۷۴

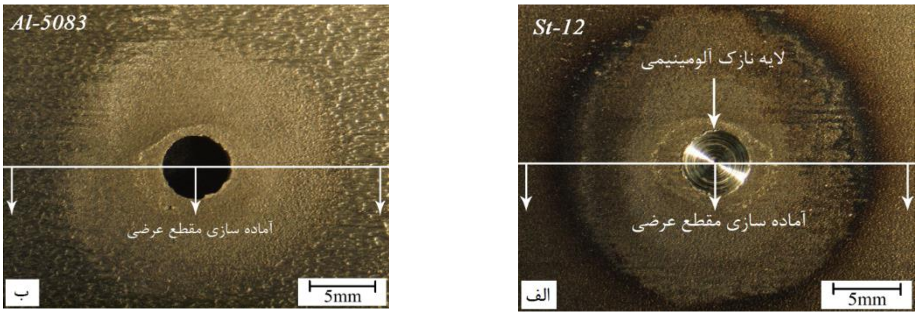
نتایج و بحث

نمای ماکروسکوپی جوش شکل (۱-الف) نشان دهنده نما از بالای نمونه جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای است. همان‌گونه که دیده می‌شود، ورق آلومینیمی در بالا و ورق فولادی در پایین قرار دارند و جوش ایجاد شده نیز در مرکز ناحیه همپوشانی دو ورق واقع شده است. شکل (۱-ب) مقطع عرضی جوش قبل از آزمون کشش را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، از ورود پین به درون ورق فولادی جلوگیری به عمل آمده است.

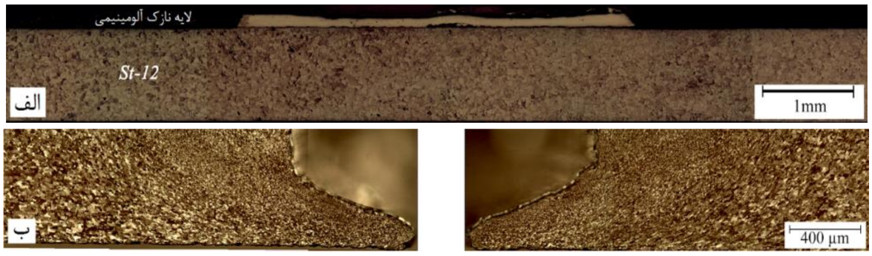
تصاویر مربوط به نما از بالای سطح رویی ورق فولادی و همچنین سطح زیرین ورق آلومینیمی پس از شکست ناشی از آزمون کشش به ترتیب در شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) نشان داده شده‌اند. بر این اساس می‌توان گفت که شکست نمونه‌ها به صورت بیرون آمدن دگمه‌ی جوش بوده و منجر به باقی ماندن یک لایه بسیار نازک و دایره‌ای شکل از آلومینیم بر روی ورق فولادی گردیده است. قطر لایه یاد شده برابر با قطر پین ابزار (۵ میلی‌متر) بود که بیانگر شکست نمونه‌ها از مناطق بسیار نزدیک به حفره به جای مانده از پین می‌باشد. پس از آزمون کشش، از هر دو ورق فولادی و آلومینیمی در امتداد مرکز جوش مقاطع عرضی تهیه شد. (شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب)). ریزساختارهای بدست آمده به ترتیب در شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب) ارائه گردیده‌اند.



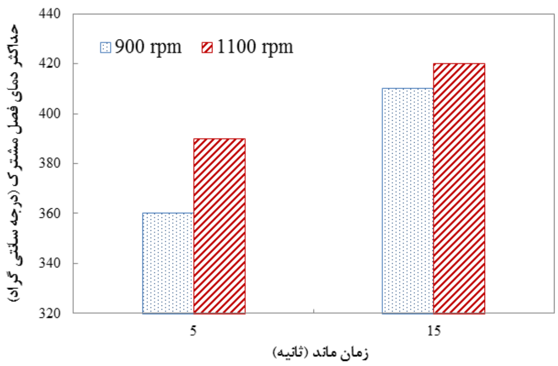
شکل ۱ (الف) نمای کلی از جوش اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای و (ب) نمای ماکروسکوپی از مقطع عرضی جوش پیش از آزمون کشش



شکل ۲ نما از بالای (الف) سطح رویی ورق فولادی و (ب) سطح زیرین ورق آلومینیمی پس از شکست ناشی از آزمون کشش



شکل ۳ مقاطع عرضی از (الف) ورق فولادی و (ب) ورق آلومینیمی پس از شکست ناشی از آزمون کشش



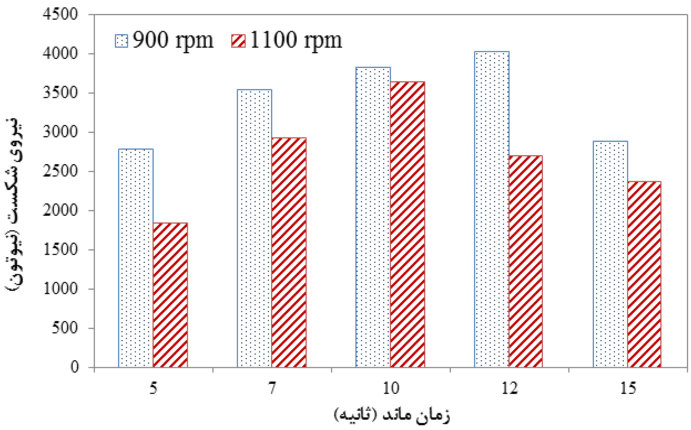
شکل ٤ حداکثر دمای ایجاد شده در فصل مشترک اتصال بر اساس سرعت چرخشی و زمان ماند اعمال شده

حداکثر دمای ایجاد شده در فصل مشترک اتصال نمونه‌ها. در این تحقیق سعی شد تا حداکثر دمای ایجاد شده در فصل مشترک اتصال تحت حالت‌های مختلف جوشکاری اندازه‌گیری شود. هدف، بررسی تاثیر متغیرهای سرعت چرخشی و زمان ماند بر روی تغییرات حداکثر دمای فصل مشترک بود. بدین منظور، سرعت‌های چرخشی ۹۰۰ و ۱۱۰۰ دور بر دقیقه هر کدام با زمان‌های ماند ۵ و ۱۵ ثانیه مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج مربوطه در شکل (٤) نشان داده شده است.

همان‌گونه که واضح است، با افزایش هر کدام از متغیرهای سرعت چرخشی و زمان ماند، حداکثر دمای ایجاد شده در فصل مشترک اتصال افزایش یافته است. افزایش حداکثر دمای ایجاد شده در فصل مشترک با افزایش سرعت چرخشی ابزار می‌تواند به دلیل اعمال تغییر شکل شدیدتر به مواد اطراف پین تحت این شرایط باشد. این در حالی است که روند افزایشی مشاهده شده برای حداکثر دمای فصل مشترک با افزایش زمان ماند می‌تواند به تولید حرارت ورودی بالاتر در اثر اعمال زمان‌های بالاتر نسبت داده شود.

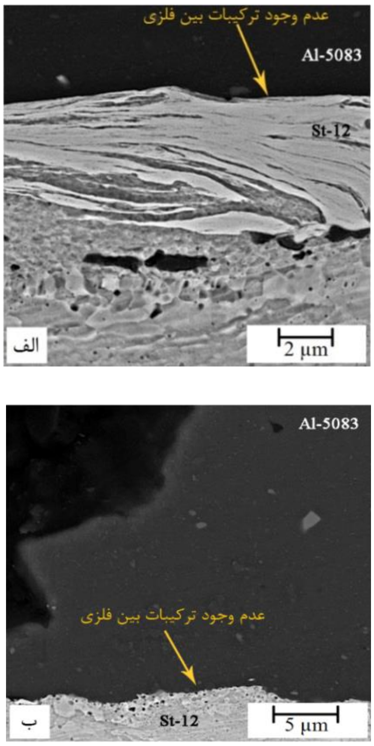
تغییرات نیروی شکست جوش‌ها بر اساس سرعت‌های چرخشی و زمان‌های ماند مورد استفاده.
نتایج مربوط به میانگین حداکثر نیروی قابل تحمل جوش‌ها با توجه به متغیرهای مورد استفاده برای جوشکاری آن‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. شایان ذکر است که مقادیر نیروی شکست گزارش شده در این تحقیق مربوط به حداکثر نیروی مشاهده شده در منحنی نیرو بر حسب جابجایی است که از آزمون کشش- برش حاصل شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، حداقل نیروی شکست در بین تمامی جوش‌ها مربوط به نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۵ ثانیه می‌باشد که برابر با ۱۸۳۰ نیوتون است. در همان سرعت چرخشی و با افزایش زمان ماند به ۷ و پس از آن به ۱۰ ثانیه، نیروی شکست افزایش یافت و به ترتیب به ۲۹۱۵ و ۳۶۳۲ نیوتون رسید. این در حالی است که با افزایش زمان ماند به مقادیر بیشتر از ۱۰ ثانیه، استحکام اتصالات روندی نزولی را از خود نشان داد به نحوی که در زمان‌های ماند ۱۲ و ۱۵ ثانیه به ترتیب مقادیر ۲۶۹۰ و ۲۳۶۳ نیوتون به دست آمد. بر اساس آنچه گفته شد، روند تغییرات نیروی شکست برای نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه به نحوی بود که حداکثر نیروی شکست به ازای زمان ماند ۱۰ ثانیه حاصل شد.

روند تغییرات نیروی شکست نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه نیز همچون نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه بود با این تفاوت که در زمان‌های ماند مشابه، اعمال سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه منجر به دست‌یابی به جوش‌های مستحکم‌تری گردید. حداقل نیروی شکست در بین نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه برابر با ۲۷۷٤ نیوتون بود که در زمان ماند ۵ ثانیه بدست آمد. با افزایش زمان ماند به ۷، ۱۰ و در ادامه به ۱۲ ثانیه، نیروی شکست جوش‌ها افزایش یافت و به ترتیب به ۳۵٤۲، ۳۸۲٤ و ٤۰۲۵ نیوتون رسید. این در حالی است که با افزایش بیشتر زمان ماند به ۱۵ ثانیه، نیروی شکست جوش به ۲۸۷۰ نیوتون نزول یافت. با توجه به روند تغییرات نیروی شکست برای نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه ملاحظه می‌شود که حداکثر نیروی شکست در زمان ماند ۱۲ ثانیه بدست آمده است.



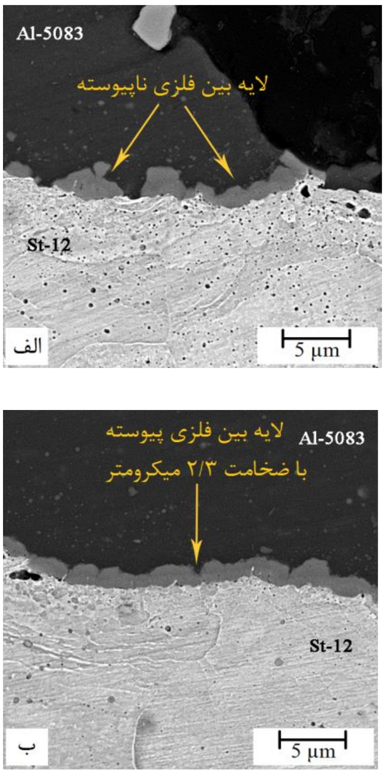
شکل ۵ تغییرات حداکثر نیروی قابل تحمل جوش بر حسب سرعت چرخشی و زمان ماند اعمال شده

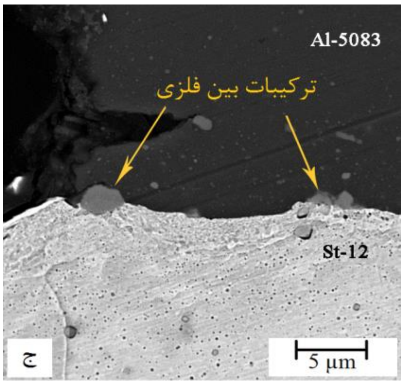
تغییرات ریزساختاری در فصل مشترک اتصال نمونه‌ها. به منظور دست‌یابی به دلایل منطقی برای تغییرات مشاهده شده در نیروی شکست اتصالات با توجه به متغیرهای مورد استفاده، تعدادی از نمونه‌ها پس از شکست مورد بررسی ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیزگر EDS قرار گرفتند. ریزساختارهای مربوط به نواحی مختلف فصل مشترک اتصال پس از شکست ناشی از آزمون کشش برای ورق فولادی نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۵ ثانیه در شکل‌های (٦-الف) و (٦-ب) نشان داده شده است. شکل (٦-الف) مربوط به نواحی مرکزی لایه نازک باقی‌مانده بر روی سطح ورق فولادی پس از شکست ناشی از آزمون کشش می‌باشد (شکل (۳-الف)) در حالی که شکل (٦-ب) بیانگر ناحیه کناری آن است.



شکل ٦ مشاهدات ریزساختاری میکروسکوپ الکترونی روبشی ورق فولادی پس از شکست آزمون کشش برای نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۵ ثانیه

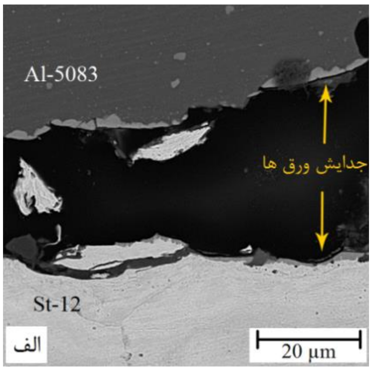
همان‌گونه که دیده می‌شود، هیچ‌گونه ترکیب بین فلزی در فصل مشترک اتصال ورق‌ها تشکیل نشده است (شکل‌های (٦-الف) و (٦-ب)). این موضوع می‌تواند به دلیل زمان ماند کوتاه حین جوشکاری این نمونه باشد که در پی آن فرصت کافی به منظور نفوذ و جابجا شدن اتم‌های آهن و آلومینیم در امتداد فصل مشترک اتصال فراهم نبوده و ترکیبات بین فلزی به وجود نیامده‌اند. تصاویر مربوط به مقطع عرضی از نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۱۰ ثانیه در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، ترکیبات بین فلزی با مورفولوژی غیرپیوسته و با ضخامت تقریبی ۲/۳ میکرومتر در فصل مشترک اتصال تشکیل شده‌اند. علاوه بر این، تصاویر حاکی از حضور ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال ورق‌ها در موضع شکست می‌باشند (شکل‌های (۷-الف) و (۷-ج)). نتایج آزمون EDS نشان داد که ترکیب بین فلزی مشاهده شده به ترتیب حاوی ۷۷ و ۲۳ درصد اتمی آلومینیم و آهن بود.

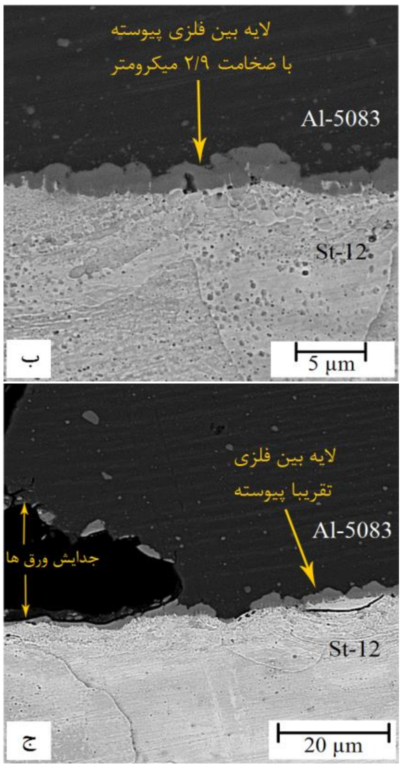




شکل ۷ مشاهدات ریزساختاری میکروسکوپ الکترونی روبشی ورق فولادی پس از شکست آزمون کشش برای نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۱۰ ثانیه

ریزساختارهای مربوط به مقطع عرضی از نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۱۵ ثانیه در شکل (۸) نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که در شکل‌های (۸-الف)، (۸-ب) و (۸-ج) دیده می‌شود، تحت شرایط جوشکاری یاد شده ترکیبات بین فلزی با مورفولوژی پیوسته‌تری نسبت به نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۱۰ ثانیه در فصل مشترک اتصال تشکیل شده‌اند به نحوی که می‌توان گفت پیوستگی تقریبا کاملی بین ورق‌های آلومینیمی و فولادی توسط لایه بین فلزی ایجاد شده است. پدیده جالبی که در این نمونه دیده شد و در مورد دو نمونه قبلی (نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان‌های ماند ۵ و ۱۰ ثانیه) مشاهده نگردید، نحوه شکست کاملا متفاوت این نمونه بود.



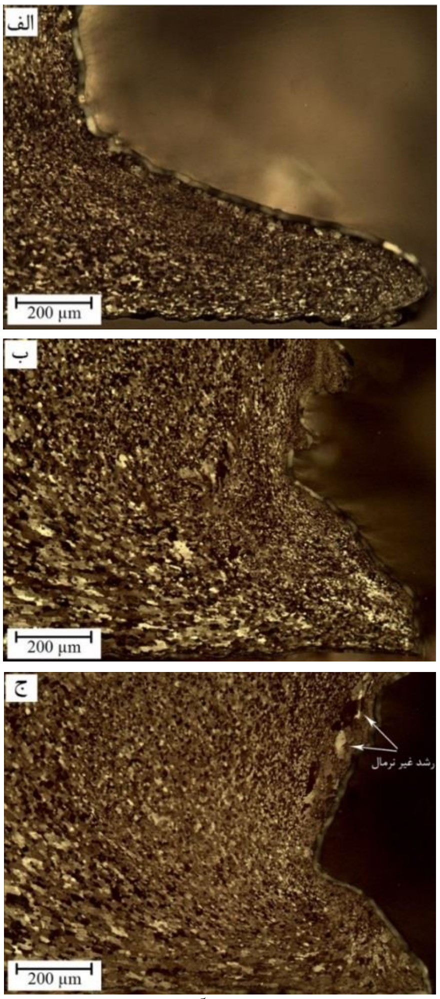


شکل ۸ مشاهدات ریزساختاری میکروسکوپ الکترونی روبشی ورق فولادی پس از شکست آزمون کشش برای نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۱۵ ثانیه

با توجه به ریزساختارهای ارائه شده در شکل (۵) برای نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۵ ثانیه دیده شد که هیچ گونه ترکیب بین فلزی در فصل مشترک اتصال تشکیل نشده بود. شکست نمونه یاد شده نیز به طور کامل از ورق آلومینیمی و در نواحی اطراف محل ورود پین رخ داده بود. ریزساختارهای ارائه شده در شکل (۷) برای نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۱۰ ثانیه نیز چنین نحوه شکستی را نشان داد با این تفاوت که در این شرایط، ترکیبات بین فلزی به صورت غیرپیوسته در فصل مشترک اتصال و در نزدیکی محل شکست حضور داشتند. در واقع، امکان دارد که جوانه‌زنی اولیه ترک‌ها برای این نمونه از ترکیبات بین فلزی موجود در این نواحی بوده باشد. اما همان‌گونه که در تصاویر موجود در شکل (۷) دیده

می‌شود، شاهدی مبنی بر اشاعه ترک در لایه بین فلـزی غیرپیوسته در فصل مشترک اتصال وجود ندارد. ایـن در حالی است که با توجه به شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) مشاهده می‌شود که در اثر بارگذاری نمونه حـین انجـام آزمون کشش- برش، ابتدا ورق‌های فولادی و آلومینیمی در نواحی اطراف حفره به‌جای‌مانده از پین و در امتـداد فصل مشترک از یکدیگر جدا شده‌اند به نحوی که ورق آلومینیمی در راستایی عمود بر محور بارگـذاری جابجـا شده است. شـایان ذکـر اسـت کـه راسـتای بارگـذاری نمونه‌ها حین آزمون کشش عمود بر صفحه بوده اسـت. علاوه بر این، همان‌گونه که شکل‌های (۸-الـف) و (۸-ج) نشان می‌دهند، ترکیبات بین فلزی بـر روی سـطوح جدا شده هر دو ورق فـولادی و آلـومینیمی جـدا شـده حضور دارند. پدیده یاد شده نشان می‌دهـد کـه در اثـر بارگذاری ناشی از آزمون کشش، ترک‌ها از ترکیبات بین فلزی موجود در فصل مشترک جوانه زده‌اند و در ادامـه در راستای لایـه بـین فلـزی پیوسـته موجـود در فصـل مشترک اتصال دو ورق اشاعه یافته‌اند. شکســت نهـایی نیز همچون نمونه‌های قبل، از ورق آلومینیم و در نواحی مجاور حفره به‌جای‌مانده از پین بوده است. نتایج آزمون EDS از لایه بین فلزی تشـکیل شـده بـا ضـخامت ۲/۹ میکرومتر در فصل مشترک اتصال این نمونـه نشـان داد که ترکیب یاد شده بـه ترتیـب حـاوی ۷۸ و ۲۲ درصـد اتمی آلومینیم و آهن می‌باشد. با مقایسه ترکیب شیمیایی بین فلزی‌های تشـکیل شـده در فصـل مشـترک اتصـال نمونه‌ها می‌توان دریافت که اختلاف چندانی بـین آن‌هـا نبوده و در واقع از یک نوع می‌باشند.

تحولات ریزساختاری ورق آلومینیمی پس از شکست ناشی از آزمـون کشـش. بـه منظـور آگـاهی از تـاثیر سرعت چرخشی ابزار بـر روی تحـولات ریزسـاختاری ورق آلومینیمی، از ورق‌های آلومینیمی جوش‌های ایجاد شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان‌های مانـد ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیـه مقـاطع عرضـی تهیـه شـد و بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نـوری و در حالت پلاریزه انجام پـذیرفت. تصـاویر مربوطـه بـه ترتیب در شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب) و (۹-ج) نشان داده شده‌اند.



شکل ۹ مشاهدات ریزساختاری ورق آلومینیمی در موضع شکست (مجاور حفره به‌جای‌مانده از پین) برای نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و مدت زمان‌های (الف) ۵ ثانیه، (ب) ۱۰ ثانیه و (ج) ۱۵ ثانیه

آن چنان که در تمامی نمونه‌ها دیده می‌شـود، دانـه‌هـای بسیار ریـز و هـم محـور آلـومینیم در مجـاورت حفـره به‌جای‌مانده از پین (موضع شکست) وجـود دارنـد کـه معرف ناحیه هـم‌زده (Stirred zone) مـی‌باشـند. محققـین معتقدند که تشکیل این ناحیه به پدیـده‌ی تبلـور مجـدد دینامیکی برمی‌گردد و علت آن نیز به اثـرات چرخشـی پین در موضع اتصال و حرارت اصـطکاکی ناشـی از آن

نسبت داده شده است [8]. ایـن در حـالی اسـت کـه بـا فاصله گرفتن از این ناحیه و دور شدن از موضع اتصال، شاهد حضور دانه‌های درشـت‌تـر آلـومینیم مـی‌باشـیم. موضوعی که در این ریزساختارها جلب توجه مـی‌کنـد، حضور دانه‌های درشت و خشن آلومینیمی است کـه در زمینه ریز و هم محور ناحیه هـم‌زده نمونـه جوشـکاری شده با سرعت چرخشـی ۱۱۰۰ دور بـر دقیقـه و زمـان ماند ۱۵ ثانیه توزیع شـده‌انـد (شـکل (۹-ج)). تشـکیل دانه‌های یاد شده می‌تواند به دلیل بـروز پدیـده‌ی رشـد غیر نرمال(Abnormal grain growth) دانه‌های آلومینیم برای نمونه یاد شده باشد.

ارتباط بین متغیرهای جوشـکاری و نیـروی شکسـت جـوش‌هـای اصـطکاکی تلاطمـی نقطـه‌ای. نیـروی شکست پایین جوش‌های ایجاد شـده در زمـان مانـد ۵ ثانیه و با سـرعت‌هـای چرخشـی ۱۱۰۰ و ۹۰۰ دور بـر دقیقه را می‌توان بر اساس نظریه‌ی بـوزی و همکـارانش [7] توجیه کرد. آنها معتقدند که اگر ترکیبات بین فلـزی به مقدار کافی در فصل مشترک اتصال آلومینیم و فـولاد شکل نگرفته باشد، وقوع شکست سریع و با نیروی کـم از احتمـال بـالایی برخـوردار خواهـد بـود. دلیـل ایـن موضوع نیز به تغییر ناگهانی ترکیب شـیمیایی در فصـل مشترک اتصال و با حرکت از ورق آلومینیمی به فولادی نسبت داده شده است. افزایش نیروی شکست جوش‌هـا با افزایش زمان ماند به تشکیل ترکیبـات بـین فلـزی در فصل مشترک اتصال برمی‌گـردد. در واقـع، بـا افـزایش زمان ماند پدیده‌های زیر رخ می‌دهد:

(الف) زمان‌های طولانی‌تری در اختیار اتم‌هـای آهن و آلومینیم جهت نفوذ در امتداد فصل مشـترک گذاشـته می‌شود و در پی آن امکان تشکیل ترکیبـات بـین فلـزی افزایش می‌یابد.

(ب) حداکثر دمای ایجـاد شـده در فصـل مشـترک اتصال افزایش می‌یابد و این موضوع منجـر بـه افـزایش ثابت رشد لایه‌ی بین فلزی می‌گردد.

با افزایش زمان ماند از ۱۰ بـه ۱۵ ثانیـه در سـرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه، نیروی شکست جوش بـه یکباره از ۳۶۳۲ بـه ۲۳۶۰ نیوتـون کـاهش یافـت. تنهـا تفاوت نمونه‌های یاد شده مربوط بـه زمـان مانـد آن‌هـا می‌باشد. همان‌گونه که قبلا ذکر شد، افزایش زمان مانـد منجر به افزایش حـداکثر دمـای ایجـاد شـده در فصـل مشترک اتصال می‌گردد (شکل (٤)). حداکثر دمای فصل مشترک اتصال برای نمونه جوشکاری شـده بـا سـرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۱۵ ثانیه برابـر با ٤۲۰ درجه سانتی‌گراد بود (شکل (٤)). بنابراین، قطعا دمای فصل مشترک اتصال برای نمونه جوشکاری شـده در همین سرعت چرخشی و زمان ماند ۱۰ ثانیه کمتر از ٤۲۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. بررسی‌های ریزساختاری فصل مشترک اتصال بـرای نمونـه جوشـکاری شـده بـا سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقـه و زمـان مانـد ۱۵ ثانیه صورت نپذیرفته است اما همان‌گونه که مشـاهدات ریزساختاری نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه و زمان مانـد ۱۵ ثانیـه در شـکل (۸) نشان داد، شکست نمونه یاد شده به نحوی بود که منجر به اشاعه ترک در امتداد لایـه‌ی بـین فلـزی موجـود در فصل مشترک اتصال با ضخامت ۲/۹ میکرومتر شده بود. شایان ذکر است که در مقایسـه بـا حـداکثر دمـای ٤۱۰ درجه سانتی‌گراد برای نمونه جوشکاری شده در سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۱۵ ثانیه، فصـل مشترک اتصال نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۱۵ ثانیه دمای بـالاتری (٤۲۰ درجه سـانتی‌گـراد) را تجربـه کـرده اسـت. ایـن موضوع نشان می‌دهد کـه احتمـال تشـکیل لایـه‌ی بـین فلزی با ضخامت بیشتر از ۲/۹ میکرومتر نیز برای نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان ماند ۱۵ ثانیه وجود خواهد داشت. بر اسـاس آنچـه ذکر شد، افت شدید نیروی شکست از ۳٦۳۲ بـه ۲۳٦۰ نیوتون با افزایش زمان ماند از ۱۰ به ۱۵ ثانیه در سرعت چرخشـی ۱۱۰۰ دور بـر دقیقـه مـی‌توانـد بـه افـزایش ضخامت لایه‌ی بین فلزی و اشـاعه تـرک در امتـداد آن حین بارگذاری ناشی از آزمون کشش نسبت داده شـود.

در سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور بر دقیقه، حداکثر نیروی شکست مربوط به نمونه جوشکاری شده با زمان ماند ۱۰ ثانیه بود. نمونه یاد شده از لایه بین فلزی با مورفولوژی غیرپیوسته و ضخامت ۲/۳ میکرومتری در فصل مشترک اتصال بهره می‌برد. بنابراین، می‌توان گفت که ضخامت یاد شده می‌تواند ضخامتی بهینه جهت دست‌یابی به حداکثر استحکام در سرعت چرخشی یاد شده باشد.

همان‌گونه که قبلا ذکر شد، حداکثر مقادیر نیروی شکست برای نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت‌های چرخشی ۱۱۰۰ و ۹۰۰ دور بر دقیقه به ترتیب در زمان‌های ماند ۱۰ و ۱۲ ثانیه بدست آمد. بر این اساس می‌توان گفت که در سرعت‌های چرخشی بالاتر (۱۱۰۰ دور بر دقیقه)، زمان ماند کمتری جهت دست‌یابی به حداکثر نیروی شکست لازم بوده است. در واقع می‌توان گفت که با افزایش سرعت چرخشی، حداکثر دمای ایجاد شده در فصل مشترک اتصال افزایش یافته و در پی آن زمان کمتری به منظور تشکیل ترکیبات بین فلزی با ضخامت بحرانی در فصل مشترک اتصال مورد نیاز بوده است.

همان‌گونه که در شکل (۹) نشان داده شد، برای نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۱۰۰ دور در دقیقه و زمان ماند ۱۵ ثانیه شاهد رشد غیر نرمال دانه‌های آلومینیم در مجاورت حفره به‌جای‌مانده از پین بودیم. این در حالی بود که پدیده یاد شده برای نمونه‌های جوشکاری شده در همان سرعت چرخشی و زمان‌های ماند کوتاه‌تر ۵ و ۱۰ ثانیه مشاهده نگردید. در واقع، رخداد پدیده یاد شده به ایجاد دماهای نسبتا بالاتر در فصل مشترک اتصال نمونه یاد شده نسبت داده شد. با توجه به آنچه گفته شد می‌توان نتیجه گرفت که افت استحکام مشاهده شده با افزایش زمان ماند از ۱۰ به ۱۵ ثانیه در سرعت‌های چرخشی ۹۰۰ و ۱۱۰۰ دور بر دقیقه به طور کامل مربوط به تغییرات ضخامت بین فلزی‌ها نبوده و بخشی از آن نیز به خسارت‌های حرارتی و رشد غیر نرمال دانه‌های آلومینیم در مجاورت حفره به‌جای‌مانده از پین بر می‌گردد. علاوه بر این، استحکام پایین‌تر نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت‌های چرخشی بالاتر در یک زمان ماند ثابت را نیز می‌توان با پدیده یاد شده مرتبط دانست. یافته‌های برخی از محققین در زمینه جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای همجنس آلیاژهای آلومینیم نیز بیانگر افت استحکام‌های برشی و حتی کششی با افزایش سرعت چرخشی ابزار می‌باشد [9 و 10]. آن‌ها این موضوع را با افزایش حرارت ورودی و رشد دانه ناشی از آن مرتبط دانسته‌اند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تاثیر متغیرهای سرعت چرخشی و زمان ماند ابزار بر روی نیروی شکست جوش‌های غیرهمجنس اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای Al–۵۰۸۳ و St–۱۲ مورد بررسی قرار گرفت. جوشکاری ورق‌ها با استفاده از روش جدیدی انجام پذیرفت که در آن از ورود ابزار به درون ورق فولادی جلوگیری شد. نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشند:

(۱) در سرعت چرخشی ۹۰۰ دور بر دقیقه و در شرایطی که از زمان‌های ماند ۵ و ۱۵ ثانیه استفاده شد، فصل مشترک اتصال به ترتیب حداکثر دماهای ۳٦۰ و ٤۱۰ درجه سانتی‌گراد را نشان داد. این در حالی است که با افزایش سرعت چرخشی به ۱۱۰۰ دور بر دقیقه، حداکثر دماهای ۳۹۰ و ٤۲۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در زمان ماندهای ذکر شده ثبت شد.

(۲) در هر دو سرعت چرخشی ۹۰۰ و ۱۱۰۰ دور بر دقیقه نیروی شکست اتصالات ابتدا با افزایش زمان ماند افزایش یافت و پس از آن روند نزولی را دنبال نمود. حداکثر مقادیر نیروی شکست برای نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت‌های چرخشی ۹۰۰ و ۱۱۰۰ دور بر دقیقه به ترتیب ٤۰۲۵ و ۳٦۳۲ نیوتون بود که به ترتیب در زمان‌های ماند ۱۲ و ۱۰ ثانیه به دست آمدند.

(۳) روند صعودی نیروی شکست با افزایش زمان ماند به تشکیل ترکیبات بین فلزی با ضخامت تقریبی ۲/۳ میکرومتر در فصل مشترک اتصال نسبت داده شد. این در حالی است که روند نزولی مشاهده شده برای نیروی شکست جوش‌ها در زمان‌های ماند طولانی به

وجود ترکیبات بین فلزی با ضخامت بـالا (۲/۹ میکرومتـر) در فصل مشترک اتصـال و همچنـین رشـد غیـر نرمـال دانه‌های آلومینیم در مجاورت حفره به‌جای‌مانده از پـین برمی‌گشت.

(٤) با افزایش سـرعت چرخشـی از ۹۰۰ بـه ۱۱۰۰ دور بر دقیقه، زمان ماند کمتری به منظور دست‌یـابی بـه جوش با حداکثر نیروی شکست مورد نیاز بود.

مراجع

1. Connolly C., "Friction spot joining in aluminum car bodies", *Industrial Robot*, Vol. 34, pp. 17-20, (2007).
2. Jiang W.H., Kovacevic R., "Feasibility study of friction stir welding of 6061-T6 aluminum alloy with AISI 1018 steel", *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, Vol. 218, pp. 1323-1331, (2004).
3. Chen C.M., Kovacevic R., "Joining of Al 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid-state welding", *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, Vol. 44, pp. 1205-1214, (2004).
4. Song J.L., Lin S.B., Yang C.L., Fan C.L., "Effects of Si additions on intermetallic compound layer of aluminum-steel TIG welding-brazing joint", *Journal of. Alloys and Compounds*, Vol. 488, pp. 217-222, (2009).
5. Lathabai S., Painter M.J., Cantin G.M.D., Tyagi V.K., "Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy", *Scripta Materialia*, Vol. 55, pp. 899-902, (2006).
6. Sun Y.F., Fujii H., Takaki N., Okitsu Y., "Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al alloy/steel joints prepared by a flat spot friction stir welding technique", *Materials Design*, Vol. 47, pp. 350-357, (2013).
7. Bozzi S., Helbert-Etter A.L., Baudin T., Criquic B., Kerbiguet G.J., "Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot welds", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 4505-4509, (2010).
8. Rosendo T., Parra B., Tier M.A.D., da Silva A.A.M., dos Santos J.F., Strohaecker T.R., et. al., "Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181-T4 aluminium alloy", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 1094-1100, (2011).
9. Tozaki Y., Uematsu Y., Tokaji K., "Effect of processing parameters on static strength of dissimilar friction stir spot welds between different aluminium alloys", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials*, Vol. 30, pp. 143-148, (2007).
10. Merzoug M., Mazari M., Berrahal L., Imad A., "Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 3023-3028, (2010).